

Izbira primerne kalibracijske metode za vektorski analizator z nestandardnimi priključki

Drago Kostevc

Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, Ljubljana
E-pošta: drago.kostevc@fe.uni-lj.si

Povzetek. Za kalibracijo vektorskih analizatorjev vezij potrebujemo določeno število kalibracijskih normal. Medtem ko so normale za standardne priključke na voljo na trgu, jih moramo za nestandardne ponavadi izdelati sami. Zato je pri kalibraciji analizatorja z nestandardnimi priključki izredno pomembno, da je kalibracijskih normal čim manj in da so takšne, da jih je mogoče izdelati z zadovoljivo natančnostjo. Izkaže se, da nobena od splošno uveljavljenih kalibracijskih metod ni primerna za širokopasovne meritve z analizatorjem z nestandardnimi priključki. Primerjava med metodami pokaže, da je najprimernejša metoda TLRL, ki je kombinacija metod TLR in TMR, razširjena z interpolacijo merjenih rezultatov v frekvenčnem prostoru.

Ključne besede: avtomatski analizator vezij, kalibracijske metode, nestandardni priključki

Choice of a suitable calibration method for automatic vector network analyzers with non-standard connectors

Extended abstract. To calibrate automatic vector network analyzers (VANA), a certain number of calibration standards is needed. For standard connectors industry-made calibration standards are available, whereas for non-standard connectors we usually have to produce them ourselves. It is therefore very important to reduce the number of the required calibration standards when calibrating VANA with non-standard connectors and to limit it to the number of standards that can be made with an adequate accuracy. It has been observed that none of the generally accepted calibration methods is useful for broadband measurements on VANA with non-standard connectors. In this paper we compare methods TLR [4], TMR [5] and TLRL [7]. Our comparison points out advantages of the TLRL method that is a combination of the TLR and TMR method extended with extrapolation of the measured results in the frequency domain.

Keywords: automatic vector network analyzer, VANA, calibration methods, non-standard connector

1 Uvod

Za merjenje četveropolnih parametrov visokofrekvenčnih vezij danes uporabljamo izključno vektorske

analizatorje vezij. Z njimi merimo parametre S neposredno po definiciji. Analizatorji se med seboj razlikujejo po tem, da imajo popolnejši štiri merilne detektorje, preprostejši pa le tri. Zunanji priključki (vrata) analizatorja so določeni s priključki merjenca, s priključki analizatorja pa so povezani z merilnima kabloma. Neposredno izmerjeni parametri so zaradi velikih sistemskih pogreškov analizatorjev za današnjo stopnjo načrtovanja vezij neuporabni, zato rezultate meritve vedno korigiramo s pomočjo pogreškovnega modela analizatorja. Parametre pogreškovnega modela določimo s kalibracijo, ki je najpomembnejši del postopka meritve. Med kalibriranjem na vrata analizatorja zaporedoma priključimo in izmerimo nekaj kalibracijskih normal. Koliko in katere normale bomo uporabili, je odvisno od kalibracijske metode, izbira le-te pa je odvisna predvsem od tipa analizatorja in priključkov analizatorja. Poznanih je veliko kalibracijskih metod, za vsak analizator pa se rezultat vsake kalibracije prevede v standardni 10-parametrski pogreškovni model, s pomočjo katerega analizator pri poznejšem merjenju odčitke meritve pretvori v parametre S . Ta standardni pogreškovni model je generični model prve generacije dvodetektorskih vektorskih analizatorjev [1,2].

Kalibriranje analizatorja je razmeroma dolgotrajen in dolgočasen postopek, med katerim je treba na zunanje priključke analizatorja zaporedoma priključevati različne normale. Zato je zaželeno, da je normal čim manj, ne le zato, da je postopek hitrejši, temveč tudi zato, ker je takrat manj možnosti za

operaterjeve napake. Vendar se je operaterjevimi napakam s skrbno izvedenim postopkom mogoče izogniti, zato je izbira metode kalibriranja analizatorja s standardnimi priključki bolj ali manj akademsko vprašanje. Pri kalibriranju analizatorja z nestandardnimi priključki pa se navedenim razlogom pridruži še eden, ki je bistveno globlji. Za standardne priključke je namreč mogoče kupiti primerne normale, za nestandardne pa moramo normale ponavadi izdelati sami. Od kalibracijskih normal nekaterih ni težko izdelati, nekatere so za realizacijo zahtevne, nekatere pa je nemogoče izdelati z zadovoljivo natančnostjo.

Pri izbiri kalibracijske metode za, denimo, merjenje parametrov elementov na tiskanem vezju ali polprevodniški rezini je torej načrtovalec pred zahtevno nalogo: izbrati kalibracijsko metodo in s primerno natančnostjo tudi izdelati kalibracijske normale. Ravno zaradi zahtevne kalibracije se naloga ponavadi konča tako, da se pri načrtovanju vezij uporabljajo kar podatki izdelovalca elementov. Kot je dobro znano, pa ti podatki niso vedno dovolj natančno izmerjeni in če meritve ne moremo ponoviti, tudi izdelovalčevih podatkov ne moremo kontrolirati. Predvsem pa so podatki izdelovalca neuporabni, če želimo element uporabljati s priključki, ki so drugačni od tistih, na katere se nanašajo podatki izdelovalca. Merjenje parametrov elementov vezij je torej pomemben del načrtovanja in realizacije visokofrekvenčnih vezij.

2 Kalibracijske normale

Pri kalibraciji uporabljamo enovhodne in dvovhodne kalibracijske normale. Kot enovhodne odbojnostne normale se uporabljajo značilna bremena: kratek stik, odprte sponke in prilagojeno breme, od dvovhodnih normal pa se za kalibriranje uporablja predvsem odsek valovoda. Te normale za standardne priključke ponujajo različni izdelovalci.

Za nestandardne priključke je od vseh normal mogoče najpreprosteje in najbolj natančno realizirati odsek valovoda ali linije, saj je ta odsek brezodbojnostna normala 'po definiciji', priključek je namreč določen prav s tem prečnim prerezom valovoda.

Od enovhodnih odbojnostnih normal je mogoče za poljuben priključek z zadovoljivo natančnostjo brez težav realizirati le kratek stik. Kratek stik je za vse valovodne strukture natančno definiran, to je prečna kovinska stena, s katero je zaprt valovod.

Pogojno je mogoče realizirati tudi odprte sponke. Odbojnost odprtih sponk je treba določiti analitično, odvisna je le od geometrije in snovnih lastnosti valovoda. Vendar problem za visoke frekvence ni trivialen, zato se navadno rešuje s približki, ki pa za kalibriranje analizatorja niso vedno dovolj natančni.

Prilagojeno breme za poljubno valovodno strukturo za visoke frekvence pa je za vsakdanje inženirstvo pretrd oreh. Mogoče so sicer improvizacije za zelo

nizke frekvence (nekaj 100 MHz) s pogojno zadovoljivo natančnostjo, sicer pa je izdelava visokofrekvenčnih prilagojenih bremen, primernih za kalibracijo vektorskih analizatorjev, prihranjena nekaj podjetjem z velikimi izkušnjami na tem področju.

Širokopasovno koaksialno prilagojeno breme je nerešljiv problem tudi za standardne priključke. Fiksno prilagojeno breme z zadovoljivo majhno odbojnostjo je mogoče izdelati le za nizke frekvence. Za višje frekvence se kot prilagojeno breme uporablja drsno breme, pri katerem brezodbojnost definira linija, po kateri drsi breme. Vendar mora biti razmah drsenja večji od četrte valovne dolžine, drsno breme razumnih dimenzij je tako uporabno le od neke mejne frekvence naprej. Uveljavljena frekvenčna meja med uporabo fiksnega in drsnega bremena je za standardne konektorje 2 GHz.

3 Katere metode bomo primerjali

Kalibracijske metode lahko v grobem razdelimo v tiste, ki so primerne za kalibracijo štiridetektorskih merilnikov, in v tiste, primerne za tridetektorske analizatorje. Za kalibracijo štiridetektorskih analizatorjev potrebujemo manj normal kot za kalibracijo tridetektorskih. Vendar je tudi za kalibriranje tridetektorskih analizatorjev z nestandardnimi priključki mogoče uporabljati metode za kalibriranje štiridetektorskih merilnikov [3]. Zato je optimalno metodo za kalibriranje analizatorjev z nestandardnimi priključki dopustno in primerno iskati le med metodami za kalibriranje štiridetektorskih analizatorjev.

Pri vseh kalibracijskih metodah je ključna brezodbojna normala, to je normala ali z odbojnostjo 0 ali z znano odbojnostjo z majhno absolutno vrednostjo. Nekatero metodo za brezodbojnost uporabljajo prilagojeno breme (*match*), nekatere pa dvovhodno normalo, predvsem odsek homogenega valovoda (*line*). Večina metod med kalibracijskim postopkom uporablja tudi meritev sklenjenih vrat (*thru*). Potem pa je treba pri posamezni metodi dodati le še primerno število normal, ki zagotavljajo zadostno število med seboj neodvisnih kalibracijskih meritev.

Najbolj razširjena kalibracijska metoda je metoda TOSM (*thru-open-short-match*). Pri primerjavah metod se ji ni mogoče izogniti, saj je generična kalibracijska metoda, primerna za vse analizatorje in vodi neposredno do standardnega pogreškovnega modela. Za brezodbojno normalo uporablja prilagojeno breme, uporablja tudi meritev sklenjenih vrat, dodatni normala pa sta ponavadi kratek stik in odprte sponke. Za kalibriranje po tej metodi potrebujemo torej tri natančno poznane odbojnostne normale, med kalibracijo pa za določitev desetih parametrov opravimo 10 med seboj neodvisnih meritev [1].

Pri kalibraciji štiridetektorskih analizatorjev je treba določiti sedem parametrov pogreškovnega vezja, za kar

zadošča ena sama natančno poznana normala. Metode z eno normalo so poznane kot samokalibracijske metode. Uveljavljeni sta predvsem dve. Pri metodi TLR (*thru-line-reflect*) [4] je normala odsek valovoda (*line*), pri metodi TMR (*thru-match-reflect*) [5] pa brezodbojno breme (*match*). Pri obeh je treba med kalibracijo pomeriti še sklenjeni vrati (*thru*) in poljubno odbojnost (*reflect*), katere faza mora biti približno poznana.

Ker je prednost glede uporabljenih normal očitno na strani samokalibracijskih metod, bomo v nadaljevanju primerjali ti dve med seboj in s standardno metodo TOSM.

4 Prednosti in pomanjkljivosti posameznih metod

4.1 Metoda TOSM

Ker je osnovna kalibracijska metoda, spada k vsakemu vektorskemu analizatorju komplet normal za standardne priključke, ki vsebuje odprte sponke, kratek stik, fiksno in drsno breme. Ta metoda je sinonim za splošno kalibracijsko metodo, večina inženirjev ne pozna in ne uporablja nobene druge.

Za kalibriranje na standardnih konektorjih je uporabna, čeprav je zamudna, saj je treba med kalibracijo desetkrat priviti in odviti priključek in še najmanj desetkrat premakniti drsno breme.

Za kalibriranje na nestandardnih konektorjih je metoda TOSM neuporabna, saj smo pri opisu kalibracijskih normal že ugotovili, da je nemogoče realizirati prilagojeno breme.

4.2 Samokalibracijske metode

4.2.1 Metoda TMR

Od vseh kalibracijskih metod je najbolj racionalna metoda TMR (*thru-match-reflect*), saj z osmimi meritvami določi sedem parametrov pogreškovnega vezja in še odbojnost pomožne odbojnosti *reflect*. Ni treba, da je odbojnost normale *match* enaka 0, mora pa biti poznana [6]. Metoda TMR je za kalibriranje standardnih konektorjev zelo uporabna, saj je manj zamudna kot metoda TOSM, predvsem pa porabi manj normal, le fiksno in drsno breme. Njena poglobljena pomanjkljivost je le, da pri kalibraciji potrebujemo drsno in fiksno breme. Med kalibracijo je treba osemkrat priviti in odviti konektor in še najmanj desetkrat premakniti drsno breme.

Za kalibriranje na nestandardnih priključkih je metoda TMR neprimerna, saj je potrebna ravno tista normala, ki jo je najtežje izdelati.

4.2.2 Metoda TLR

Metoda TLR (*Thru - Reflect - Line*) je najbolj natančna metoda za kalibracijo avtomatskih analizatorjev vezij sploh [4]. Brezodbojna normala je odsek linije, za katero ni treba poznati dolžine, preostale normale so

enake kot pri metodi TMR. Med kalibracijo opravimo 10 meritev, iz katerih določimo 7 parametrov pogreškovnega vezja, dolžino kalibracijske linije in odbojnost bremena *reflect*, ena meritev pa je odvečna. Za kalibriranje analizatorjev s standardnimi priključki je zelo primerna. Narobe nam hodi le to, da standardni komplet normal ponavadi ne vsebuje precizne linije. Med kalibracijo je treba le osemkrat priviti in odviti konektor. Očitno je metoda tudi favorit za najprimernejšo metodo za kalibriranje analizatorjev z nestandardnimi priključki, saj je od vseh normal najlaže z zadovoljivo natančnostjo izdelati ravno odsek homogenega valovoda. Zato si jo pogledimo boljše.

Izkaže se, da ima metoda resno pomanjkljivost pri širokopasovnih meritvah. Če je kalibracijska linija prekratka (in je torej faza prevajalnega parametra približno enaka 0) je meritev z linijo podobna meritvi sklenjenih vrat in torej v sistem enačb ne prinese nič novega. Sistem kalibracijskih enačb je slabo pogojen in kalibracija je pri nizkih frekvencah neveljavna. Izkušnje kažejo, da je spodnja še veljavna frekvenca podana s fazo prevajalnega parametra linije 18° . Iz tega sledi ocena spodnje veljavne frekvence f_s

$$f_s \approx \frac{v_f}{20l}, \quad (1)$$

pri čemer je v_f fazna hitrost na liniji, l pa njena dolžina. Najugodnejša dolžina kalibracijske linije je četrtnina valovne dolžine, pri frekvencah, pri katerih je dolžina kalibracijske linije enaka celoštevilskemu mnogokratniku polovične valovne dolžine, pa se neveljavnost ciklično ponavlja. Zato so neveljavna frekvenčna področja f_{mv} okolice celoštevilskih mnogokratnikov osnovne neveljavne frekvence f_0

$$f_{mv} = k f_0 \pm f_s \quad f_0 = \frac{v_f}{2l} \quad (2)$$

Za 10 cm dolgo zračno linijo je osnovna neveljavna frekvenca 1,5 GHz, neveljavna frekvenčna področja so široka približno 300 MHz, spodnja veljavna frekvenca pa je 150 MHz.

Metoda TLR je torej zelo primerna za kalibriranje analizatorjev z nestandardnimi priključki za meritve v frekvenčnem obsegu največ v razmerju 1: 9. Pri teh meritvah je treba le izbrati dolžino kalibracijske linije tako, da bo na sredini področja dolga četrtnina valovne dolžine. Pri večjih razmerjih pa si pomagamo na dva načina. Prvi je, da pri kalibraciji uporabimo več različno dolgih linij, katerih neveljavna področja se ne prekrivajo. Kombinacija linij, dolgih 10 in 9 cm ima prvo skupno neveljavno frekvenco pri 15 GHz, najnižjo frekvenco pa 150 MHz, obseg je torej približno 1:100. Za več je treba dodati še tretjo linijo. Očitno pa je, da tudi tako ne odpravimo neveljavnega področja pri nizkih frekvencah, za katere potrebujemo nerazumno dolge kalibracijske linije, enačba (1). Predolge kalibracijske linije so zelo nepraktične, če vzamemo za mejo dolžino 30 cm zračne linije, lahko s takšno linijo

kalibriramo analizator do frekvence 50 MHz. Če želimo meriti v frekvenčnem področju, ki sega do nižjih frekvenc, je treba metodo kombinirati z metodo TMR, dodati je torej treba še fiksno prilagojeno breme in pri nizkih frekvencah kalibrirati sistem po metodi TMR, pri visokih pa po metodi TLR.

Povzamemo lahko, da je izmed 'čistih' uveljavljenih metod za kalibriranje analizatorjev z nestandardnimi priključki nedvomno najbolj primerna metoda TLR. Pri tej metodi potrebujemo le eno absolutno normalo, to je linijo, ki jo je mogoče zelo natančno izdelati. Je popolna metoda za meritve v frekvenčnem pasu do 1: 9. Če pa želimo opravljati meritve do zelo nizkih frekvenc in tudi v širokem frekvenčnem pasu, potrebujemo pri kalibraciji dve liniji in prilagojeno fiksno breme in metodo kombinirati z metodo TMR. Predvsem potreba po dodatnem prilagojenem bremenu za kalibracijo pri nizkih frekvencah omejuje rabo te, kot smo doslej ugotovili, zelo primerne metode.

4.2.3 Metoda TLRL

Dandanes je zelo preprosto izvedljivo tudi zelo kompleksno računanje. Zato je sprejemljivo še tako zahtevno računanje, če lahko z njim nadomestimo katerokoli meritve. Pri metodi TLR se kar vsiljuje možnost, nekako kalibrirati analizator v razmeroma ozkih neveljavnih področjih z upoštevanjem meritev v širokih veljavnih področjih.

Takšno razširitve metode TLR podaja metoda TLRL (*thru-line-reflect-load*), ki jo je avtor objavil v [7]. Gre za to, da manjkajoče kalibracijske meritve nadomestimo z interpolacijo meritev v veljavnih področjih. Seveda je dopustna le interpolacija na podlagi modela, ki ustreza fizikalni resničnosti. Pri interpolaciji pri predlagani metodi je upoštevano dejstvo, da za majhna realna mikrovalovna bremena z majhnimi parazitnimi reaktancami brez dvoma velja, da njihov odziv na enotin impulz v časovnem prostoru hitro izzveni. Časovni odziv elementa je namreč zaporedje delnih odzivov, ki si sledijo v časih, določenih predvsem z dimenzijami elementa. Za bremena z majhno absolutno vrednostjo odbojnosti gotovo velja zelo konzervativna groba ocena, da časovni odziv izzveni v času t_z

$$t_z < \frac{10d}{v_f}, \quad (3)$$

pri čemer je d linearna dimenzija elementa, v_f pa fazna hitrost valovanja v elementu.

Za v času navzgor omejeno odbojnost velja, da je odbojnost v frekvenčnem prostoru popolnoma določena pri vseh frekvencah, tudi če so podatki izmerjeni le pri diskretnih frekvencah, če je le frekvenčni korak manjši ali kvečjemu enak koraku f_p , ki je podan z zgornjim časom odziva t_z . To zagotavlja dualna oblika Nyquistovega izreka o vzorčenju, ki podaja največji dopustni korak f_p :

$$f_p = \frac{1}{2t_z}. \quad (4)$$

Izrek sicer natančno velja le za neskončen niz podatkov v frekvenčnem prostoru, sicer pa je treba niz podatkov pomnožiti z ustrežno okensko funkcijo. Tehnike procesiranja podatkov so dobro znane za dualni primer, ko je signal z navzgor omejenim frekvenčnim spektrom vzorčen v diskretnih časih, Nyquistov izrek pa zagotavlja, da je tako vzorčen signal poznan tudi v vseh vmesnih časih. Tehnika pridobitve digitalnega signala v vmesnih časih se imenuje interpolacija.

Med kalibracijo po metodi TLRL poleg normal, potrebnih za kalibracijo TRL, izmerimo še dodatno pomožno breme (*load*). Nato s primernim interpolacijskim algoritmom (v tehniki digitalnega procesiranja znanim z imenom ničelna interpolacija, *zero interpolation*), ki upošteva omejenost odziva tega bremena v časovnem prostoru, določimo njegovo odbojnost v neveljavnih frekvenčnih področjih. V drugem koraku kalibriramo merilni sistem še v teh neveljavnih točkah po metodi TMR, pri čemer uporabimo z interpolacijo določeno odbojnost pomožnega bremena kot normalo *match*. Ker je z odzivom za pozitivne frekvence za realna vezja podan tudi odziv za negativne frekvence, določanje odbojnosti pomožnega bremena *load* tudi za frekvence pod spodnjo veljavno frekvenco kalibracijske linije ni ekstrapolacija, temveč interpolacija. Tako lahko po tej metodi natančno kalibriramo analizator tudi pri nizkih frekvencah brez uporabe prilagojenega bremena.

Če upoštevamo, da je frekvenčni korak vzorčenja parametrov S enak pasovni širini neveljavnih področij (enačbi (1) in (2)) in upoštevamo še enačbi (3) in (4), dobimo osnovno grobo oceno, da mora biti kalibracijska linija veliko daljša od dimenzij pomožnega bremena, česar pri realizaciji ni težko upoštevati.

Edina pomanjkljivost metode TLRL je, da ni vgrajena v analizatorje vezij, da torej zahteva razmeroma zahtevno namensko računanje. Vendar danes to ni več nikakršen problem.

Metoda je bila ob predlaganju verificirana samo z računalniško simulacijo, za potrditev z meritvami bi bila potrebna merilna oprema, ki je takrat ni bilo na voljo. Seveda lahko merilno metodo dokončno potrdi ali ovrže le meritve. Ker se je avtorju pred kratkim ponudila možnost delati s primerno opremo, je opravil nekaj meritev, ki so povsem potrdile predpostavke.

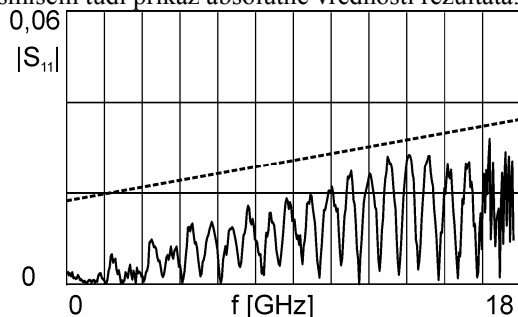
5 Verifikacija metode TLRL

Metoda je bila verificirana z meritvami na vektorskem analizatorju vezij HP 8510A, kot generator je bil uporabljen sintetizirani koračni oscilator HP 8640B. Ker vektorski analizator te kalibracije ne podpira, smo ga upravljali z osebnim računalnikom preko kartice HP-IB. Vektorski analizator je rabil le za opravljanje surovih

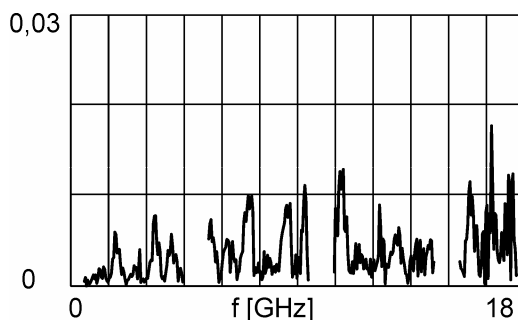
meritev, vsi kalibracijski postopki in korekcija meritev so bili opravljeni z računalnikom.

Sistem s priključki APC7 smo kalibrirali s precizno zračno linijo Maury 2653D, dolgo 10 cm, za normalo *reflect* so bile uporabljene odprte sponke Maury 2616D1, za pomožno breme *load* pa breme Maury 2611E z deklarirano neubranostjo 1,5. Za pomožno breme je bilo namenoma izbrano breme z razmeroma veliko neubranostjo, ki pomeni za metodo neugodnejše razmere kot dobro ubrano breme, ki je normala že sama po sebi. Rezultate meritev smo primerjali z rezultati meritev z analizatorjem, kalibriranim po metodi TLR s kalibracijsko linijo Maury 2653H, dolgo 3 cm. Koordinatna mreža je na vseh slikah narisana tako, da ordinate pomenijo neveljavne frekvence za kalibracijsko zračno linijo, dolgo 10 cm (mnogokratniki frekvence 1,5 GHz). Neveljavne frekvence pri referenčni metodi TLR so mnogokratniki frekvence 5 GHz, zato v okolici teh frekvenc primerjalne meritve manjkajo.

Rezultati primerjalnih meritev se med seboj tako malo razlikujejo, da bi bil prikaz v isti sliki nepregleden. Po drugi strani velja tudi, da je absolutna vrednost razlike izmerjenih rezultatov po metodi TRLR in po referenčni metodi ocena meje absolutnega pogreška merilnika, kalibriranega po predlagani metodi. Zato pri vsaki meritvi podajamo najprej rezultate meritev po metodi TLRL in nato posebej še absolutno vrednost razlike izmerjenih rezultatov po obeh metodah. Za verifikacijo metode bi pravzaprav zadoščal že prikaz teh razlik, vendar je znano, da so pogreški merilnika odvisni tudi od absolutne vrednosti izmerjenega rezultata, zato je smiselni tudi prikaz absolutne vrednosti rezultata.

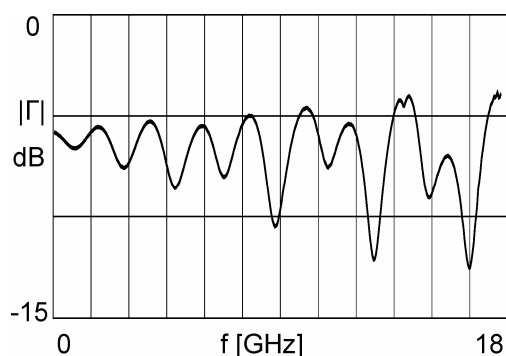


Slika 1: Absolutna vrednost S_{11} merjene linije
Figure 1: Absolute value of S_{11} of the measured line

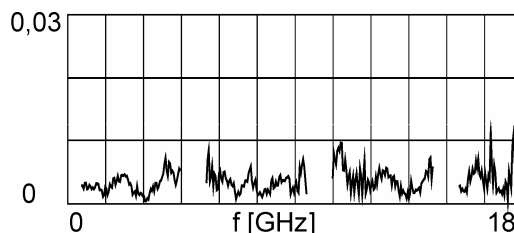


Slika 2: Absolutna vrednost razlike meritev S_{11}
Figure 2: Absolute value of the difference in measurements of S_{11}

Izmerili smo parametre 20 cm dolge zračne linije HP 11567A in vhodno odbojnost atenuatorja z dušenjem 3 dB, na drugih vratih zaključenega s kratkim stikom. Absolutna vrednost parametra S_{11} linije je na sliki 1, s črtkano črto je vrisana največja absolutna vrednost po podatkih izdelovalca. Na sliki 2 je podana absolutna vrednost razlike obeh meritev. Na sliki 3 je podana absolutna vrednost vhodne odbojnosti atenuatorja, zaključenega s kratkim stikom, na sliki 4 pa absolutna vrednost razlike obeh meritev.



Slika 3: Absolutna vrednost odbojnosti bremena
Figure 3: Absolute value of the load reflection coefficient



Slika 4: Absolutna vrednost razlike meritev odbojnosti bremena
Figure 4: Absolute value of difference in measurements of the load reflection coefficient

Iz rezultatov meritev je razvidno, da je razlika med meritvijo po metodi TRLR in po referenčni metodi TRL pri veliki večini meritev manjša od 0,01 in da niso te razlike v neposredni okolici ordinat, ki pomenijo neveljavna področja kalibracijske linije metode TRLR, nič večje kot v preostalem področju. Obenem velja tudi, da je meja absolutnega pogreška merilnika HP 8510A približno 0,01. Iz primerjalnih meritev torej sledi, da je v okviru merjenj na merilniku HP 8510A nemogoče ugotoviti, da je kalibracijska metoda TRLR manj natančna od referenčne metode TRL. S tem smo kalibracijsko metodo TRLR verificali tudi z meritvami.

6 Sklep

Kalibracijska metoda TLRL v sebi združuje prednosti metod TLR in TMR. Za kalibracijo je potrebna le ena primarna normala, to je referenčna homogena linija. Natančnost kalibracije je primerljiva z natančnostjo kalibracije TLR. Za pomožno breme *load* smemo izbrati

breme z razmeroma veliko neubranostjo, in, kar je najpomembnejše, katerega odbojnosti ni treba poznati, saj jo določimo med kalibracijo.

Za enako natančno kalibriran sistem v tako širokem frekvenčnem področju bi morali pri metodi TLR uporabiti vsaj dve kalibracijski liniji in prilagojeno fiksno breme, pri metodi TMR pa drsno in fiksno breme.

Iz naštetih razlogov je metoda TLRL pravzaprav edina praktično uporabna metoda za kalibriranje vektorskih analizatorjev z nestandardnimi priključki.

Drago Kostevc je diplomiral leta 1974, magistriral leta 1981 in leta 1985 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je bil leta 2001 tudi izvoljen za izrednega profesorja. Zaposlen je na Fakulteti za elektrotehniko, težišče njegovega raziskovalnega dela je na mikrovalovnem področju. Ukvarja se z računalniškim načrtovanjem, optimiranjem in modeliranjem pasivnih in aktivnih mikrovalovnih elementov in z metodami za izboljšanje natančnosti mikrovalovnih meritev.

7 Literatura

- [1] J. Fitzpatrick, Error Models for System Measurement, *Microwave Journal*, May 1978, pp. 63 – 66
- [2] Kostevc D., Merjenje matrike porazdelitve z vektorskimi analizatorji veziji, *Elektrotehniški vestnik*, Ljubljana, 1994, vol. 61 (1 – 2), pp. 29 – 36
- [3] D. Kostevc, J. Mlakar, 'Samokalibracijske metode za tridetektorske vektorske analizatorje vezij, ERK 2002, Portorož, pp. 155 – 158
- [4] G.F.Engen, C.A.Hoer, "Thru-Reflect-Line": An Improved Technique for Calibrating the Dual Six-Port Automatic Network Analyzer, *IEEE Trans. MTT*, vol. MTT-27, No.12, Dec. 1979, pp. 987 – 993
- [5] H.J.Eul, B.Schiek, Thru-Match-Reflect: One Result of a Rigorous Theory for De-embedding and Network Analyzer Calibration, *18th European Microwave Conference Proceedings*, Sept.1988, pp.909 – 914,
- [6] D. Kostevc, J. Mlakar, 'Explicit Formulas for TMR Calibration with Different Match Standards on Both Ports', *Elektrotehniški vestnik*, Ljubljana 1996, vol. 63, No. 4 – 5, str. 281 – 285
- [7] Kostevc D., Simple Extension of TRL Calibration Method of VANA, *Electronics Letters*, 1995, vol. 31, No. 8, pp. 634 – 635